

# 基于最优有效度的电力系统可靠性 原始参数的线性组合预测模型

王遂, 任震

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 针对电力系统可靠性原始参数缺乏和开发可靠性原始参数小样本的需要, 提出了电力系统可靠性原始参数的线性组合预测模型。为了提高预测精度, 分别应用灰色优化模型和 Verhulst 模型等改进模型进行可靠性原始参数的预测。与此同时, 建立以有效度为目标函数的最优组合预测模型, 并用简化的计算公式得到权系数的最优近似解, 将预测值进行线性组合。基于该文所开发的预测模型的预测结果表明, 组合预测模型的预测结果优于单一模型的预测结果。

**关键词:** 可靠性原始参数; 最优有效度; 线性组合预测模型; 电力系统

## Linear combination forecasting model of original reliability parameter of power systems based on optimal effectiveness indicator

WANG Sui, REN Zhen

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** According to the lack of the original reliability parameter and the necessity of exploiting original reliability parameter small stylebook, a linear combination forecasting model of original reliability parameter of power systems is proposed. In order to improve the forecasting accuracy, the improved models, such as grey optimum model and Verhulst model, are carried out for forecasting original reliability parameter separately. Meanwhile, a combined forecasting optimal model is set up, which is based on the effectiveness indicator, and the simplified calculation formula is used to get the optimal approximate solution about weight coefficient, and the final results are obtained by linear combining forecasting model. The results of using the proposed model indicate that the forecasting result of combining forecasting model is better than that of the single model.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50337010).

**Key words:** original reliability parameter; optimal effectiveness indicator; linear combination forecasting model; power systems

中图分类号: TM732

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)06-0030-04

## 0 引言

电力系统可靠性是对电力系统按可接受的质量标准和所需数量不间断地向电力用户供应电力和电能之能力的度量<sup>[1]</sup>。数据的收集与分析是定量地表示可靠性, 改进产品和对产品进行可靠性预测, 因此, 数据分析是一切可靠性工作的基础, 进行正确的数据收集与分析是非常重要的工作。传统的可靠性原始参数的分析要求的是大样本系统, 在数据不充分的情况下, 开发电力系统可靠性原始参

数小样本系统, 补充数据量以增强可靠性原始参数可信性是很有必要的。灰色系统理论的特点是“少数据建模”, 对于电力系统少数据、贫信息不确定问题提供了很好的解决方法。因此, 利用灰色预测模型对元件可靠性原始参数的发展过程进行模拟和预测是一条行之有效的途径。由于经典 GM(1, 1) 预测模型本身的缺陷, 预测效果不十分理想, 缺乏稳定性<sup>[2]</sup>。在可靠性原始参数预测的实际运用中, 对 GM(1, 1) 模型的改进已有很多种, 如新息模型, 等维新息, 可变参数  $\alpha$  修正模型<sup>[3]</sup>, 残差修正模型<sup>[4]</sup>等, 在一定程度上均提高了预测精度。

本文以更高的可靠性原始参数的预测精度为

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50337010)

出发点, 提出了基于最优有效度的电力系统可靠性原始参数的线性组合预测模型。利用优化灰色模型和 Verhulst 模型分别对可靠性原始参数进行建模预测, 最后将两者预测值统一在最优近似权系数组合式里, 得出组合预测模型预测值。通过对预测结果的比较分析, 该组合预测模型优于单一预测模型, 其预测精度有很大提高。

## 1 灰色系统模型

### 1.1 经典 GM(1, 1) 模型

设原始数据  $X^{(0)} = \{x^{(0)}(k)\}$ , 其一次累加序列为  $X^{(1)} = \{x^{(1)}(k)\}$ ,  $k=1, 2, \dots, n$ 。利用原始数据  $X^{(0)}$  和累加序列  $X^{(1)}$  生成矩阵  $B$  和  $Y$ :

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2), 1 \\ -z^{(1)}(3), 1 \\ \vdots \\ -z^{(1)}(n), 1 \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2), 1 \\ x^{(0)}(3), 1 \\ \vdots \\ x^{(0)}(n), 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $z^{(1)}(k)$  为灰导数的白化背景值, 且背景值  $z^{(1)}(k) = \frac{1}{2}[x^{(1)}(k-1) + x^{(1)}(k)]$ 。按最小二乘法可求得参数:

$$[a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (2)$$

$x^{(1)}$  的灰色预测模型为:

$$\hat{x}^{(1)}(k) = [x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}]e^{-a(k-1)} + \frac{b}{a} \quad (3)$$

式中:  $a$  为发展系数;  $b$  为灰作用量。

### 1.2 灰色优化模型 (GOM)

为提高 GM(1,1)模型的预测精度, 使模型残差最小, 提出了灰色优化模型(GOM)<sup>[5]</sup>。通过对累加生成序列  $X^{(1)}$  作平移变换(设平移值为  $mov$ ), 根据平移值  $mov$  与模型精度之间的数量关系, 确定使残差最小的最优平移值  $mov$ 。

假设将 GM(1,1)模型中  $x^{(1)}(k)$  换为  $x^{(1)}(k) + c$  后, 模型参数与平移值  $mov$  之间的数量关系为:

$$\begin{aligned} z^{(1)}(k) &\rightarrow z_1^{(1)}(k), & a &\rightarrow a_1, & b &\rightarrow b_1, \\ \hat{x}^{(1)}(k) &\rightarrow \hat{x}_1^{(1)}(k), & \hat{x}^{(0)}(k) &\rightarrow \hat{x}_1^{(0)}(k). \end{aligned}$$

不难证明如下定理:

$$\begin{cases} a_1 = a \\ b_1 = b + mov \cdot a \\ \hat{x}_1^{(0)}(k) = \hat{x}^{(0)}(k) + mov \cdot (e^a - 1) \cdot e^{-a(k-1)} \end{cases} \quad (4)$$

确定残差最小的平移值  $mov$  的目标函数为:

$$\min Residual(mov) = \min \sum_{k=1}^n [q_1^{(0)}(k)]^2 \quad (5)$$

其中  $q_1^{(0)}(k)$  为 GOM 模型的残差, 按下式计算:

$$q_1^{(0)}(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}_1^{(0)}(k) \quad (6)$$

将式(4)、式(6)代入式(5), 将  $Residual(mov)$  对  $mov$  求导并令其为零, 得模型的最优解为:

$$mov = \frac{e^a + 1}{1 - e^{-2(n-1)a}} \sum_{k=2}^n q^{(0)}(k) e^{-a(k-1)} \quad (7)$$

$q^{(0)}(k)$  为 GM(1,1)模型的残差, 计算式同(6)式。利用上述方法, 只需利用经典的 GM(1,1)模型算出参数  $a, b$ ; 然后用推导式(7)得到最优平移值  $mov$ , 对累加生成序列  $X^{(1)}$  作平移处理, 在按 GM(1,1)模型计算过程计算, 最后得到优化预测结果。整个 GOM 模型的思路十分清晰, 容易理解, 计算量也较小。

## 2 Verhulst 模型

Verhulst 模型属于灰色系统中的一种特殊模型, 其解的轨迹为 S 型曲线, 主要用来非单调的摆动发展序列或有饱和的 S 型序列。根据可靠性理论, 典型故障率函数呈浴盆曲线形状, 处于初期运行的元件, 故障率具有下降趋势, 并逐步进入稳定不变区域。因此, 与此相对应的可靠性原始参数变化规律, 可用 Verhulst 模型来预测。以累加数据  $x^{(1)}(k)$  为基础的 Verhulst 模型为:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b(x^{(1)})^2 \quad (8)$$

式中:  $a, b$  为待定参数, 由最小二乘法及极值原理求解:

$$[a, b]^T = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (9)$$

$$Y = [x^{(0)}(2) \ x^{(0)}(3) \ \dots \ x^{(0)}(n)] \quad (10)$$

$$A = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & (-z^{(1)}(2))^2 \\ -z^{(1)}(3) & (-z^{(1)}(3))^2 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & (-z^{(1)}(n))^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

将参数  $a, b$  代入 Verhulst 模型求得模型唯一解

为:

$$\hat{x}^{(1)}(k) = \frac{a/b}{1 + (\frac{a}{bx^{(1)}(0)} + 1)e^{-a(k-1)}} \quad (12)$$

当给定  $k=1,2,\dots,n$ , 就可得到相应序列  $\hat{x}^{(1)}(1)$ ,  $\hat{x}^{(1)}(2)$ , ...,  $\hat{x}^{(1)}(n)$ , 在作一阶累减还原计算, 得到原始序列的 Verhulst 预测值。

### 3 最优有效度的线性组合预测模型

设  $\hat{x}_1^{(0)}(k)$  是优化灰色预测模型的预测值,  $\hat{x}_2^{(0)}(k)$  是 Verhulst 模型的预测值。取  $w_1$  和  $w_2$  为相应的权系数, 且  $w_1 + w_2 = 1$ , 得线性组合预测模型预测值:

$$\hat{x}^{(0)}(k) = w_1 \hat{x}_1^{(0)}(k) + w_2 \hat{x}_2^{(0)}(k) \quad (13)$$

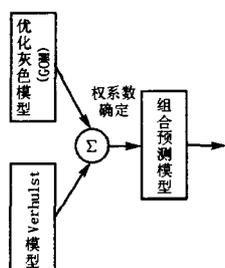


图 1 组合预测模型

Fig.1 Compound prediction model

线性组合预测模型组合过程如图 1 所示。组合预测模型综合利用各单一预测方法提供的信息, 提高了预测精度, 权系数的确定成为组合预测的难点

所在。常见的权系数处理方法有: 灰关联加权组合<sup>[6]</sup>, 最小方差准则<sup>[7,8]</sup>, 以及最小残差平方和的最优组合<sup>[9,10]</sup>。本文采用文献[11]提出的以有效度为目标函数的权系数确定方法, 近似解得权系数的最优解。

以有效度指标为目标函数, 构造如下约束优化问题:

$$\max S = E(A_i) \cdot (1 - \sigma(A_i)) \quad (14)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} w_1 + w_2 = 1 \\ w_1, w_2 \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

其中:  $A_i$  为组合预测模型的预测精度, 且预测精度  $A_i = 1 - |q^{(0)} / x^{(0)}|$ ,  $E(A_i)$ ,  $\sigma(A_i)$  分别为由  $A_i$  构成预测方法的精度序列的均值和均方差。

上述优化问题的近似最优解的计算式可参考文献[11]。有效度指标综合了预测精度的均值和方差两个指标, 是一种反映预测方法优劣的较合理指标, 构造的预测方法预测也更有效。

### 4 算例

在统计日期内, 某直流系统极 II 交流滤波器无故障运行时间原始数据分别为(单位为天): 803d, 926d, 1135d, 1365d, 1559d, 1844d。本文以原始数列 {803, 926, 1135, 1365, 1559} 为基础, 分别用经典 GM(1,1) 模型, 优化灰色模型 (GOM), Verhulst 模型对原始数列进行建模预测。然后, 用本文提出最优有效度的线性组合预测模型的组合方法, 解得最优组合权系数为  $w_1 = 0.727$ ,  $w_2 = 0.273$ , 最后得出最优组合预测模型及模拟值, 计算结果如表 1 所示。

表 1 计算结果比较

Tab.1 Comparison of the calculating results

序号	实际值	GM(1,1)		GOM		Verhulst		组合预测	
		模拟值	相对误差	模拟值	相对误差	模拟值	相对误差	模拟值	相对误差
1	803	803	0	803	0	803	0	803	0
2	926	947	0.022 7	949.79	0.025 7	966.78	0.044	954.43	0.03
3	1 135	1 121.9	0.011 6	1 125.1	0.008 7	1 150.59	0.013 7	1 132.06	0.002 6
4	1 365	1 329	0.026 4	1 332.8	0.023 6	1 351.91	0.009 5	1 338.02	0.019 8
5	1 559	1 574.3	0.009 8	1 578.9	0.012 8	1 566.6	0.004 88	1 575.5	0.01
平均相对误差		0.017 7		0.017 7		0.018 02		0.015 7	
残差平方和		2 147.65		2 093.45		2 135.32		1 817.08	

由表 1 可见, 最优组合预测模型的模拟值的平均相对误差为 0.015 7, 残差平方和为 1 817.08d<sup>2</sup>, 该预测结果明显要优于其它单一预测模型的预测

结果。在单一预测模型中, 优化灰色模型 GOM 与 GM(1,1) 从平均相对误差来看几乎相等, 但 GOM 的残差平方和指标要明显低于 GM(1,1), 这点不难从

GOM 以残差平方和最小的建模机理看出。总的来说,组合预测模型预测精度最高,GOM 预测模型要优于经典 GM(1,1)模型。

利用建立的 GM(1,1)、GOM、Verhulst 和组合预测模型,分别进行第一步预测,并将预测结果与实际值校核,各模型预测值如表 2 所示。由表中结果看出,组合预测模型得到的预测值已经非常逼近实际值。

表 2 无故障运行时间预测分析

Tab.2 Analysis of forecasted time to failure

	预测值	残差	相对误差
实际值	1844		
GM(1,1)	1 864.9	-20.9	0.011
GOM	1 870.3	-26.3	0.014
Verhulst	1 789.2	54.8	0.029 7
组合预测	1 848.2	-4.2	0.002 3

实际中,电力设备何时出现故障受许多随机因素影响,致使最终设备的无故障运行时间也具有随机特性。组合预测模型兼顾了单一模型预测特点,提取单一预测方法的一些有用信息,取得了很好的预测效果。

## 5 结论

1) 本文提出了基于最优有效度的电力系统可靠性原始参数的线性组合预测模型。分别采用优化灰色模型和 Verhulst 模型等改进灰色模型进行参数预测,将两者预测值统一在线性组合式里,得到最终组合预测值。

2) 权系数的确定是组合预测模型的难点所在,本文提出的以有效度为目标函数的权系数确定方法,采用简化公式求得权系数的近似最优解,不仅计算量小,而不失有效性。

3) 实际算例表明,该组合预测模型的预测精度明显优于单一预测模型的预测结果。所提方法有效地提高了预测精度。为电力系统可靠性原始参数预测提供了一种新的、有效的方法。

## 参考文献

- [1] 郭永基.电力系统可靠性分析[M].北京:清华大学出版社,2003.  
GUO Yong-ji. Power System Reliability Analysis[M]. Beijing :Tsinghua University Press, 2003.
- [2] 谢乃明,刘思峰.离散GM(1,1)模型与灰色预测模型建模机理[J].系统工程理论与实践,2005,(1):93-99.

- XIE Nai-ming, LIU Si-feng. Discrete GM(1,1) and Mechanism of Grey Forecasting Model[J]. Systems Engineer-theory &Practice, 2005, (1):93-99.
- [3] 任震,万官泉,黄金凤,等.电力系统可靠性原始参数的改进预测[J].电力系统自动化,2003,27(4):37-40.  
REN Zhen, WAN Guan-quan, HUANG Jin-feng, et al. Prediction of Original Reliability Parameter of Power Systems by an Improved Grey Model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(4):37-40.
- [4] 任震,吴敏栋,黄雯莹.电力系统可靠性原始参数的滚动预测和残差修正[J].电力自动化设备,2006,26(7):10-12.  
REN Zhen, WU Min-dong, HUANG Wen-ying. Rolling Prediction and Residual Error Revise of Original Reliability Parameter of Power System[J].Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(7): 10-12.
- [5] 肖新平,宋中民,李峰.灰技术基础及其应用[M].北京:科学出版社,2005.  
XIAO Xin-ping, SONG Zhong-ming, LI Feng. Grey Technology Basis and Application[M]. Beijing: Science Press,2005.
- [6] 朱常青,王秀和,张鑫,等.基于灰关联加权组合模型的电力负荷预测研究[J].电力系统及其自动化学报,2006,18(2):79-81.  
ZHU Chang-qing, WANG Xiu-he, ZHANG Xin, et al. A Novel Load Forecasting Method Based on Grey Relational Weighing Combination Model[J].Proceedings of the CSU-EPSA,2006,18(2):79-81.
- [7] 邢棉,杨实俊,牛东晓,等.多元指数加权电力负荷灰色优化组合预测[J].电网技术,2005,29(4):8-11.  
XING Mian, YANG Shi-jun, NIU Dong-xiao, et al. Research on Gray Optimization Combination Power Load Forecasting Based on Multivariate Exponential Weighting[J]. Power System Technology,2005, 29(4): 8-11.
- [8] 李伟,韩力.组合灰色预测模型在电力负荷预测中的应用[J].重庆大学学报(自然科学版),2004,27(1):36-39.  
LI Wei, HAN Li. Application of Combination Grey Model in Power Load Forecasting[J].Journal of Chongqing University,Natural Science Edition,2004,27(1):36-39.
- [9] 李媛媛,牛东晓.基于最优可信度的月度负荷综合最优灰色神经网络预测模型[J].电网技术,2005,29(5):16-19.  
LI Yuan-yuan, NIU Dong-xiao. An Optimum credibility based Integrated Optimum Gray Neural Network Model of Monthly Power Load Forecasting[J]. Power System Technology,2005,29(5):16-19.

(下转第 67 页 continued on page 67)

本保护可与其他保护配合构建双保护或多保护系统,从而使整个线路的运行更加稳定。在这里本装置仅针对距离保护。其它的不再说明。

精确地实现交流采样、信号调理、A/D转换、保护算法、判断输出与故障录波等,是一种全新的微机保护装置。

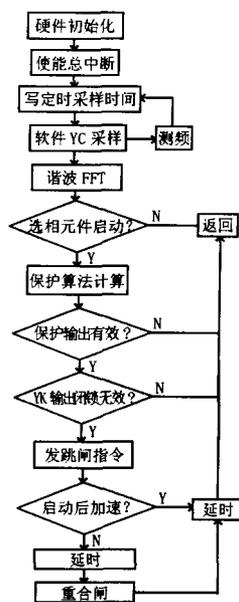


图 4 DSP 部分软件设计框图

Fig.4 Block diagram of software structure of DSP part

#### 4 结束语

ARM+DSP实现的微机距离保护,是基于IEC60870变电站自动化体系而设计的,过程层与间隔层、间隔层与变电站层间的通信方式将采用标准的以太网方式(TCP/IP协议),不仅能方便实现标准以太网通信方式,兼容IEC60870规约,还能实时、

#### 参考文献

[1] 樊江涛,等. ARM处理器+DSP构架的微机馈线保护装置的研制[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(1):77-80.  
FAN Jiang-tao, et al. Microcomputer-based Feeder protection on ARM & DSP Architecture[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1):77-80.

[2] 周森,等. IEC60870-5-103规约在微机型继电保护测试系统中的应用[J]. 继电器, 2005, 33(12):16-18.  
HOU Sen, et al. Application of IEC60870-5-103 Standard in Field of the Testing of Microprocessor-based Protective Relay[J]. Relay, 2005, 33(12):16-18.

[3] 李岩,等. T接短线路微机纵差保护原理研究[J]. 电力自动化设备, 1999, 19(2):21-23.  
LI YAN, et al. Research of Microcomputer Differential Current Protection Principle for Structure Short Transmission Line[J]. Electric Power Automation Equipment, 1999, 19(2):21-23.

[4] 任雁铭,等. 基于嵌入式以太网的变电站自动化系统通信网络[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(17):36-38.  
REN Yan-ming, et al. Computer Communication Network Based on Embedded Ethernet Technique for Substation Automation Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(17):36-38.

收稿日期: 2006-08-28

作者简介:

陈堂贤(1965-),男,副教授,从事电力电子与电力传动的教学与研究。E-mail:ctxhappy1@ctgu.edu.cn

(上接第 33 页 continued from page 33)

[10] 李林川,吕冬,武文杰.一种简化的电力系统负荷线性组合预测法[J].电网技术,2002,26(10):10-13.  
LI Lin-chuan, Lü Dong, WU Wen-jie. A Linear Combination Based Simplified Load Forecasting Method for Power System[J]. Power Systems Technology, 2002, 26(10):10-13.

[11] 王明涛.确定组合预测权重系数最优近似解的方法研究[J].系统工程理论与实践,2000,(3):104-109.  
WANG Ming-tao. Study on Method of Calculating Optimal Approximate Solution about Weigh Coefficients of Combined Forecasting Methods[J]. System Engineering Theory and Practice, 2000, (3):104-109.

[12] 刘思峰,党耀国,方志耕,等.灰色系统理论及其应用(第

三版)[M].北京:科学出版社,2004.

LIU Si-feng, DANG Yao-guo, FANG Zhi-geng, et al. Grey System Theory and Its Application, Third Edition[M]. Beijing: Science Press, 1999.

收稿日期: 2006-10-11; 修回日期: 2006-12-06

作者简介:

王遂(1981-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统可靠性与规划;E-mail:epwangsui@sina.com

任震(1938-2007),男,教授,博士生导师,国务院学位委员会电气工程学科组成员,IEEE高级会员,从事电力系统规划与可靠性、高压直流输电、小波分析及其在电力系统中的应用、电源滤波、电力市场等领域的科研和教学工作。